

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-114078  
(43)Date of publication of application : 27.04.1999

(51)Int.CI.

A61N 5/10

(21)Application number : 09-287003  
(22)Date of filing : 20.10.1997

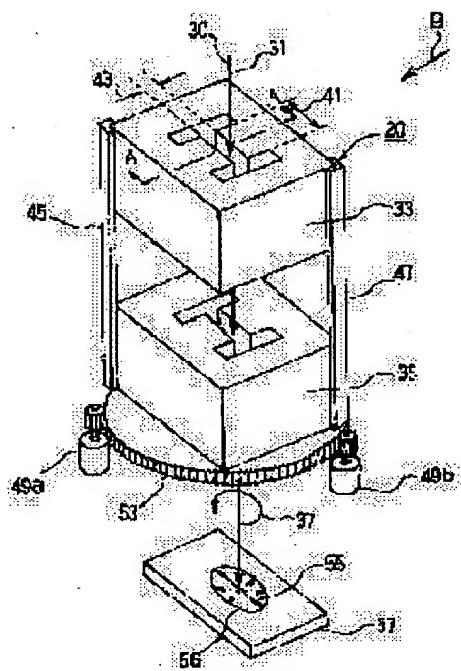
(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP  
(72)Inventor : GAMA ETSUTORA

## (54) CHARGED PARTICLE RAY IRRADIATING DEVICE, CHARGED PARTICLE RAY ROTARY IRRADIATING DEVICE AND CHARGED PARTICLE RAY IRRADIATING METHOD

### (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a charged particle ray irradiating device by which parallel beam scanning in bi-axial directions is realized in an irradiating area and also the device is made to be small and light.

SOLUTION: A pair of scanning electromagnets 33 and 35 connected by connecting frames 45 and 47 which generate a scanning magnetic fields consisting of a pair of magnetic fields for bending a charged particle ray 31 in mutually opposite directions by same angle are rotated by a rotary driving gear 53 where they are mounted and motors 49a and 49b for rotation so as to realize bi-axial direction parallel beam scanning.



### LEGAL STATUS

- [Date of request for examination] 06.09.2001  
[Date of sending the examiner's decision of rejection]  
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]  
[Date of final disposal for application]  
[Patent number]  
[Date of registration]  
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]  
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]  
[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-114078

(43)公開日 平成11年(1999)4月27日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

A 6 1 N 5/10

A 6 1 N 5/10

H

審査請求 未請求 請求項の数14 OL (全16頁)

(21)出願番号

特願平9-287003

(71)出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(22)出願日

平成9年(1997)10月20日

(72)発明者

蒲 越虎

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

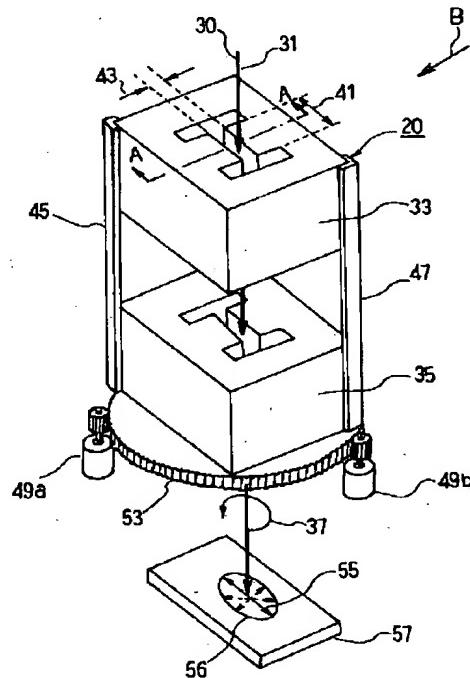
(74)代理人 弁理士 曾我 道照 (外6名)

(54)【発明の名称】 荷電粒子線照射装置、荷電粒子線回転照射装置、および荷電粒子線照射方法

(57)【要約】

【課題】 照射領域において2軸方向の平行ビームスキヤニングを実現させると共に、小形軽量化を図った荷電粒子線照射装置を提供する。

【解決手段】 荷電粒子線31を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の磁場からなるスキヤニング磁場を発生する連結フレーム45、47で連結された1組のスキヤニング電磁石33、35を、これを搭載した回転駆動用歯車53と回転させるためのモータ49a、49bで回転させ、2軸方向の平行ビームスキヤニングを実現させる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段と、  
上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生手段を回転させる回転手段と、  
を有することを特徴とする荷電粒子線照射装置。

【請求項2】 上記スキャニング場発生手段が磁場を発生することを特徴とする請求項1に記載の荷電粒子線照射装置。

【請求項3】 上記スキャニング場発生手段が電場を発生することを特徴とする請求項1に記載の荷電粒子線照射装置。

【請求項4】 上記荷電粒子線を照射面に垂直になるように偏向する荷電粒子線の偏向手段と、

この偏向手段の下流側に設置され、上記荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記偏向手段からの荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、  
上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線エネルギー調整手段と、

少なくとも上記偏向手段および荷電粒子線照射装置を一体化して回転させる回転移動手段と、  
を有することを特徴とする荷電粒子線回転照射装置。

【請求項5】 上記荷電粒子線が上記回転移動手段の回転軸方向から上記偏向手段に入射され、

上記偏向手段は、照射面に平行な方向から入射された荷電粒子線を3回の90度の偏向により照射面に垂直になるように偏向する3つの偏向電磁石を含み、  
上記被照射体が上記回転移動手段の回転軸上に配置される、

ことを特徴とする請求項4に記載の荷電粒子線回転照射装置。

【請求項6】 上記偏向手段の各偏向電磁石が超電導電磁石からなることを特徴とする請求項5に記載の荷電粒子線回転照射装置。

【請求項7】 荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心とし上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、  
上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、

上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、

上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、

上記荷電粒子線を停止させる手段と、  
上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、  
を備え、  
上記制御手段が、

照射領域の座標群[ $P_i : i=1, 2, \dots, n$ ] (初期値として $i=1$ ) に合わせて上記スキャニング場発生部の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1の手段と、

10 上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2の手段と、

上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合、および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3の手段と、

上記荷電粒子線が停止された時に、全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していなければ、 $i$ を1つ増加させて上記スキャニング場発生部の回転角

20 度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1の手段から第3の手段を繰り返し起動させ、完了していれば照射を終了する第4の手段と、  
を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射装置。

【請求項8】 上記第4の手段において、上記スキャニング場発生部の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生部の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1の手段から第3の手段を繰り返して起動させることを特徴とする請求項7に記載の荷電粒子線照射装置。

【請求項9】 荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心とし上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、  
上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、

40 上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた照射された荷電粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、  
上記荷電粒子線を停止させる手段と、

上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、  
を備え、

上記制御手段が、  
照射領域の座標群[( $Z_{ij}, \theta_{ij}$ ),  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ] のうちの照射深度の位置座標  $Z_{ij}$  (初期値として $i=1$ ) に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第

50 合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第

1の手段と、

上記スキャニング場発生部の回転角度を $\theta_{ij}$ (初期値として $j=1$ )に、スキャニングパターンの時間特性を $i_{ij}(t)$ に設定する第2の手段と、

上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性 $i_{ij}(t)$ により上記スキャニング場発生部を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3の手段と、

この第3の手段のスキャニングと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4の手段と、

上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5の手段と、

上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していなければ照射深度の位置座標 $Z_i$ を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合は $j$ を1つを増加させて、上記第2の手段から第5の手段を繰り返して起動させ、変更する場合は $i$ を1つを増加させ、 $j$ を初期値の1にして、上記第1の手段から第5の手段を繰り返して起動させる第6の手段と、

を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射装置。

【請求項10】 上記スキャニング場発生部が上記スキャニングパターンの時間特性 $i_{ij}(t)$ を $i_{ij}(t) \propto \sqrt{t}$ としたことを特徴とする請求項9に記載の荷電粒子線照射装置。

【請求項11】 荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心に回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、

照射領域の座標群[ $P_i : i=1, 2, \dots, n$ ] (初期値として $i=1$ )に合わせて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、

上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2のステップと、

上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合、および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3のステップと、

上記荷電粒子線が停止された時に、全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していなければ上記第1のステップに戻り、 $i$ を1つ増加させて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上

記第1のステップから第3のステップを繰り返し、完了していれば照射を終了する第4のステップと、を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射方法。

【請求項12】 上記第4のステップにおいて、上記スキャニング場発生手段の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生手段の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返すことを特徴とする請求項11に記載の荷電粒子線照射方法。

【請求項13】 荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、

照射領域の座標群[( $Z_i, \theta_{ij}$ ),  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ]のうちの照射深度の位置座標 $Z_i$ (初期値として $i=1$ )に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、

上記スキャニング場発生手段の回転角度を $\theta_{ij}$ (初期値として $j=1$ )に、スキャニングパターンの時間特性を $i_{ij}(t)$ に設定する第2のステップと、

上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性 $i_{ij}(t)$ により上記スキャニング場発生手段を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3のステップと、

この第3のステップと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4のステップと、

上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5のステップと、

上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していなければ照射深度の位置座標 $Z_i$ を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合は $j$ を1つを増加させて、上記第2のステップに戻り第2のステップから第5のステップを繰り返し、変更する場合は

$i$ を1つを増加させ、 $j$ を初期値の1にして、上記第1のステップに戻り第1のステップから第5のステップを繰り返す第6のステップと、

を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射方法。

【請求項14】 上記スキャニング場発生手段が1回に照射領域の半径のみに渡ってスキャニングを行い、上記スキャニングパターンの時間特性 $i_{ij}(t)$ を $i_{ij}(t) \propto \sqrt{t}$ としたことを特徴とする請求項13に記載の荷電粒子線照射方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、荷電粒子線治療装置等で使用される荷電粒子線照射装置、荷電粒子線回転照射装置、および荷電粒子線照射方法に関するものである。

#### 【0002】

【従来の技術】図16は例えばメディカルフィジックス(Med. Phys.)、第22巻、第37～53頁に掲載されたスイスのペドロニ(Pedroni)等によるレポートに開示された従来の荷電粒子線治療装置である荷電粒子線回転照射装置の例である。

【0003】図において、100は荷電粒子線回転照射装置で、1は粒子加速器、3は輸送系電磁石、5はエネルギーディグレーダ、7は陽子線ビーム、9はビームストッパー、10は回転ガントリー、11、13および19は偏向電磁石、15は集束電磁石、17はスキャニング電磁石、21はエネルギーディグレーダ、23は線量・位置モニタ、25は患者、27は照射ベッド、29はガントリー回転軸である。

【0004】加速器1から発生された陽子線ビームは輸送系電磁石3によって運ばれ、初段のエネルギー変化手段としてのエネルギーディグレーダ5を通過して所定のエネルギーを有する陽子線ビーム7となる。この陽子線ビーム7は、最初の偏向電磁石11で水平の方向から上方に曲げられた後、再び偏向電磁石13で水平方向に戻される。

【0005】さらに陽子線ビーム7は集束電磁石15によって集束された後、スキャニング電磁石17で上下方向に掃引される。掃引された陽子線ビームは最後の偏向電磁石19により、真下方向に向くように曲げられ、微調整用のエネルギーディグレーダ21と線量・位置モニタ23を経て患者25に照射される。

【0006】ここで電磁石11、13、15、17、19、エネルギーディグレーダ21およびモニタ23は一体化され、照射ガントリーを構成する。照射ガントリーはガントリー回転軸29を中心に回転できるようになっており、回転ガントリー10と呼ばれる。

【0007】患者25に照射される陽子線ビームは、スキャニング電磁石17と偏向電磁石19によって図16に示されるX軸方向のみにおいて平行にスキャニングされる。治療に必要なY軸方向のスキャニングについては、照射ベッド27を移動させることにより行われ、患者27の深さ方向(Z軸方向)のスキャニングはエネルギーディグレーダ21による陽子線ビームエネルギーの調整で行われる。

【0008】なお、例えば回転ガントリー10の長手方向の長さは約10m、ガントリー内で陽子線ビームが立ち上げられる長さが約2mである。

#### 【0009】

【発明が解決しようとする課題】以上のように構成された従来の荷電粒子線治療装置では、1軸方向(上記例で

はX軸方向)の平行ビームスキャニングしか実現できず、治療中にベッド27により患者25をY軸方向に移動する必要があった。このような移動は、患者に不快感や恐怖感を与える恐れがあると同時に照射領域の位置ズレを生じさせることが問題になっていた。

【0010】また、上記のような従来の装置では、平行にビームをスキャニングさせる為に、スキャニング電磁石17を偏向電磁石19の上流に設置する必要があり、スキャニング電磁石17によって上下にスキャニングされた陽子線ビームすなわち荷電粒子線を偏向する偏向電磁石19が大型のものになっていた。その結果、上述した治療用の回転ガントリー10の総重量が100トン以上にもなっていた。また、偏向電磁石19が数十センチの磁極幅を有する大型なものである為、超電導化した場合は、製造コストが非常に高くなってしまう問題もあった。

【0011】この発明は、上記のような問題を解決するためになされたもので、ベッドを移動せずに照射領域において、2軸方向の平行ビームスキャニングを実現させると共に、回転ガントリーの小型軽量化を図った荷電粒子線照射装置、荷電粒子線回転照射装置、および荷電粒子線照射方法を提供することを目的とする。

#### 【0012】

【課題を解決するための手段】上記の目的に鑑み、この発明は、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段と、上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生手段を回転させる回転手段と、を有することを特徴とする荷電粒子線照射装置にある。

【0013】またこの発明は、上記スキャニング場発生手段が磁場を発生することを特徴とする荷電粒子線照射装置にある。

【0014】またこの発明は、上記スキャニング場発生手段が電場を発生することを特徴とする荷電粒子線照射装置にある。

【0015】またこの発明は、上記荷電粒子線を照射面に垂直になるように偏向する荷電粒子線の偏向手段と、この偏向手段の下流側に設置され、上記荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記偏向手段からの荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線エネルギー調整手段と、少なくとも上記偏向手段および荷電粒子線照射装置を一体化して回転させる回転移動手段と、を有することを特徴とする荷電粒子線回転照射装置にある。

【0016】またこの発明は、上記荷電粒子線が上記回転移動手段の回転軸方向から上記偏向手段に入射され、

上記偏向手段は、照射面に平行な方向から入射された荷電粒子線を3回の90度の偏向により照射面に垂直になるように偏向する3つの偏向電磁石を含み、上記被照射体が上記回転移動手段の回転軸上に配置される、ことを特徴とする荷電粒子線回転照射装置にある。

【0017】またこの発明は、上記偏向手段の各偏向電磁石が超電導電磁石からなることを特徴とする荷電粒子線回転照射装置にある。

【0018】またこの発明は、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられ照射された荷電粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、上記荷電粒子線を停止させる手段と、上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、を備え、上記制御手段が、照射領域の座標群[(Z<sub>i</sub>, θ<sub>i</sub>), i=1, 2, ..., m, j=1, 2, ..., n]のうちの照射深度の位置座標Z<sub>i</sub>(初期値としてi=1)に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1の手段と、上記スキャニング場発生部の回転角度をθ<sub>ij</sub>(初期値としてj=1)に、スキャニングパターンの時間特性をl<sub>ij</sub>(t)に設定する第2の手段と、上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性l<sub>ij</sub>(t)により上記スキャニング場発生部を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3の手段と、この第3の手段のスキャニングと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4の手段と、上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5の手段と、上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していない場合は照射深度の位置座標Z<sub>i</sub>を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合はjを1つを増加させて、上記第2の手段から第5の手段を繰り返して起動させ、変更する場合はiを1つを増加させ、jを初期値の1にして、上記第1の手段から第5の手段を繰り返して起動させる第6の手段と、を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射装置である。

【0019】またこの発明は、上記第4の手段において、上記スキャニング場発生部の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生部の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1の手段から第3の手段を繰り返して起動させることを特徴とする荷電粒子線照射装置にある。

【0020】またこの発明は、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調

整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられ照射された荷電粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、上記荷電粒子線を停止させる手段と、上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、を備え、上記制御手段が、照射領域の座標群[(Z<sub>i</sub>, θ<sub>i</sub>), i=1, 2, ..., m, j=1, 2, ..., n]のうちの照射深度の位置座標Z<sub>i</sub>(初期値としてi=1)に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1の手段と、上記スキャニング場発生部の回転角度をθ<sub>ij</sub>(初期値としてj=1)に、スキャニングパターンの時間特性をl<sub>ij</sub>(t)に設定する第2の手段と、上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性l<sub>ij</sub>(t)により上記スキャニング場発生部を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3の手段と、この第3の手段のスキャニングと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4の手段と、上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5の手段と、上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していない場合は照射深度の位置座標Z<sub>i</sub>を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合はjを1つを増加させて、上記第2の手段から第5の手段を繰り返して起動させ、変更する場合はiを1つを増加させ、jを初期値の1にして、上記第1の手段から第5の手段を繰り返して起動させる第6の手段と、を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射装置である。

【0021】またこの発明は、上記スキャニング場発生部が上記スキャニングパターンの時間特性l<sub>ij</sub>(t)をl<sub>ij</sub>(t)∞√tとしたことを特徴とする荷電粒子線照射装置にある。

【0022】またこの発明は、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、照射領域の座標群[P<sub>i</sub> : i=1, 2, ..., n](初期値としてi=1)に合わせて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2のステップと、上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合、および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3のステップと、上記荷電粒子線が停止された時に、全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断

し、完了していなければ上記第1のステップに戻り、 $i$ を1つ増加させて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返し、完了していれば照射を終了する第4のステップと、を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射方法にある。

【0023】またこの発明は、上記第4のステップにおいて、上記スキャニング場発生手段の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生手段の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返すこととする特徴とする荷電粒子線照射方法にある。

【0024】またこの発明は、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、照射領域の座標群 $[(Z_i, \theta_{ij}), i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n]$ のうちの照射深度の位置座標 $Z_i$ (初期値として $j=1$ )に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、上記スキャニング場発生手段の回転角度を $\theta_{ij}$ (初期値として $j=1$ )に、スキャニングパターンの時間特性を $|ij(t)$ に設定する第2のステップと、上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性 $|ij(t)$ により上記スキャニング場発生手段を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3のステップと、この第3のステップと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4のステップと、上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5のステップと、上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していなければ照射深度の位置座標 $Z_i$ を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合は $j$ を1つを増加させて、上記第2のステップに戻り第2のステップから第5のステップを繰り返し、変更する場合は $i$ を1つを増加させ、 $j$ を初期値の1にして、上記第1のステップに戻り第1のステップから第5のステップを繰り返す第6のステップと、を備えたことを特徴とする荷電粒子線照射方法にある。

【0025】またこの発明は、上記スキャニング場発生手段が1回に照射領域の半径のみに渡ってスキャニングを行い、上記スキャニングパターンの時間特性 $|ij(t)$ を $|ij(t) \propto \sqrt{t}$ としたことを特徴とする荷電粒子線照射方法にある。

【0026】

#### 【発明の実施の形態】

実施の形態1. 図1はこの発明の一実施の形態による荷電粒子線照射装置の構成を示す図である。20は荷電粒子線照射装置で、30はビームの入射軸、31は荷電粒子線ビーム(例えば、陽子線ビーム、炭素線ビーム等)、33、35は方向が互いに逆で、強度と有効磁界の長さ(入射軸30に沿った長さ)が同じである均一な磁場を発生し、荷電粒子線ビームの入射軸30に沿って、一定の間隔をおいて設置された2台のスキャニング電磁石である。41はスキャニング電磁石33、35の磁極幅、43は磁極ギャップを示す。45と47は電磁石33、35間を連結する連結フレームである。

【0027】53は荷電粒子線照射装置20を回転軸37を中心に回転させるための回転駆動用歯車、49a、49bはこの歯車53を回転させるモータである。57は被照射体、56は照射領域、55は掃引された荷電粒子線ビームの軌跡の一例を示したものである。なお、図2は図1のA-A線に沿った断面図で、34はスキャニング電磁石33、35の磁場方向を示す。また図3は図1の矢印Bの方向から見たスキャニング電磁石33、35の透視側面図で、荷電粒子線ビームのスキャニング状態を示す。

【0028】以下動作について説明する。入射された荷電粒子線ビーム31はまずスキャニング電磁石33によって一定角度だけ曲げられた後、再び磁場方向が逆で、強度と有効磁界の長さが同じであるスキャニング電磁石35によって同じ角度だけ反対方向に曲げられ、元の荷電粒子線ビーム31と平行なビームとして照射される。その結果、掃引軌跡55で示されているスキャニング軌跡に沿ってスキャニングされた荷電粒子線ビームは常に入射時のビーム31と平行である。

【0029】さらに電磁石33と35が連結フレーム45、47によって一体化され、モータ49a、49b等の回転手段によって、回転軸37の回りを回転させられることによって、被照射体57において56で示されるような2次元照射領域が実現される。

【0030】また、ビーム31の強度と断面形状が一定の場合には、照射領域56において回転軸37が通る中心部はその外側と比べて、単位面積当たりにより多くの粒子を受け入れることになる。掃引軌跡55に沿って掃引速度をビーム31が入射軸30からスキャニングされる距離に反比例するように、スキャニング電磁石33、35の電流を制御し、また回転によるスキャニングの回転ステップを十分細かくすれば、照射領域56において図4で示した均一な照射粒子数密度分布が実現できる。

【0031】また、スキャニング電磁石33、35が発生する磁場が均一であるため、流す電流の大きさと、ビーム31が入射軸30からスキャニングされる距離との関係は図5で示しているように正比例関係になる。従つて、図6および図7に示すようにスキャニング電磁石3

3、35の電流I(t)を制御すれば、掃引速度がビーム31が入射軸30からスキャニングされる距離に反比例するようになる。

【0032】なお、上記実施の形態ではスキャニング電磁石33、35の磁場強度および有効磁界の長さは同一としたが、ビーム31を互いに逆の方向に同じ角度だけ曲げるものであれば、磁場強度および有効磁界の長さがそれぞれ同一なものでなくともよい。

【0033】また、上記実施の形態では荷電粒子線ビーム31を入射軸30に対して、平行にスキャニングさせるために、2台の電磁石33、35を用いたが、荷電粒子線ビーム31を常に互いに逆の方向に同じ角度だけ曲げられる2つ1組のスキャニング磁場を発生できれば、単数または複数の電磁石、あるいはスキャニング磁場を発生できるように工夫された永久磁石(例えば永久磁石の空間配置を機械的に変動させられるようにした永久磁石)などから構成されたスキャニング磁場発生装置でもよい。

【0034】例えば、図8はスキャニング磁場発生手段として、2台のC形スキャニング電磁石33、35を用いた例である。また図3から分かるように電磁石33の磁極幅41は電磁石35の磁極幅41よりも小さくてもよく、照射装置20全体の重量を軽減できる。極端な場合には、電磁石33の磁極断面を扇形にしてもよい。さらにスキャニング電磁石33、35の磁極ギャップ43は、この磁極ギャップ43の方向のスキャニングは行う必要がないので、入射させる荷電粒子線ビーム31の断面サイズ程度まで小さくすることができます。

【0035】この実施の形態では、2軸方向平行ビームスキャニングを行う、簡単な構造でコンパクトな荷電粒子線照射装置を実現できる。

【0036】実施の形態2、図9はこの発明の別の実施の形態による荷電粒子線治療装置等として使用される荷電粒子線回転照射装置の構成を示す図である。従来および上述の実施の形態のものと同一もしくは相当部分は同一符号で示し説明は省略する。図9の荷電粒子線回転照射装置101では、偏向電磁石19とエネルギーディグレーダ21の間に上述の実施の形態の荷電粒子線照射装置20が設けられている。従って偏向電磁石19にはスキャニング前のビーム31が入射されるため、従来のものに比べて非常に小形のものとなっている。これにより被照射体である患者25の位置を回転ガントリー10のガントリー回軸29上とすることができる。

【0037】次に動作について説明する。荷電粒子線回転照射装置101において、加速器1から出た高エネルギーの荷電粒子線ビームは輸送系電磁石3によって初段のエネルギーディグレーダ5へ運ばれる。このエネルギーディグレーダ5を通過した所定のエネルギーを有する荷電粒子線ビーム31は、最初の偏向電磁石11で水平の方向から上方に曲げられた後、再び偏向電磁石13で

水平方向に戻される。

【0038】さらに荷電粒子線ビームは集束用の電磁石15によって集束された後、偏向電磁石19に入射される。上述のようにこの実施の形態の装置101では、偏向電磁石19の前ではビームをスキャニングせず、ビーム31は細いペンシルビームのまま電磁石19によって真下に向くように曲げられる。従って、図10に示されている偏向電磁石19の磁極幅22および磁極ギャップ18の両方を小さくすることができ、回転ガントリー10の総容量および総重量を小さくすることができる。

【0039】従来の装置では、偏向電磁石19の磁極幅22は図16で示されているスキャニング電磁石17によってスキャニングされた荷電粒子線ビームをカバーする必要があり、数十センチになっていた。

【0040】またこの実施の形態では偏向電磁石19が小形であるため、他の偏向電磁石11、13と共に容易に超電導化することができ、回転ガントリー10のさらなる小型軽量化が可能となる。また、偏向電磁石19から出た荷電粒子線ビーム31がスキャニング電磁石3

10 3、35によって実施の形態1で説明したように、入射方向と常に平行するようにスキャニングされる。

【0041】この実施の形態では、図9で示しているように、2軸方向において平行にビームスキャニングが実現できるため、患者25を載せた照射ベッド27の移動は不必要となり、治療装置において照射位置精度の向上が図られる効果がある。

【0042】また、荷電粒子線が深部腫瘍治療に必要なエネルギー250MeV程度の陽子線ビーム(磁場に対するレジディティは2.43テスラ・メートル)で、直径20cmの照射領域をスキャニングする場合は、偏向電磁石19を超電導化した場合、そのサイズを40cm程度に、スキャニング電磁石33、35を含む荷電粒子線照射装置20の端から端までの長さを120cm程度にすることができるため、回転ガントリー10の回転半径を2m程度に抑えることができる。

【0043】その結果、従来の装置と異なり、2次元平行ビームスキャニングを実現しながら、患者25を回転ガントリー10のガントリー回軸29上に置くことができ、回転ガントリー10の構造を大幅に簡素化できる。さらに、上述の250MeVの陽子線を発生する回転ガントリーを備えた治療装置の重量を従来の半分以下にすることが可能である。

【0044】なお、図9ではエネルギーディグレーダ21および線量・位置モニタ23が回転ガントリー10に搭載されているものを示したが、これらのエネルギーディグレーダ21および線量・位置モニタ23は回転ガントリー10と別体に設けられてもよい。

【0045】実施の形態3、図11はこの発明の別の実施の形態による荷電粒子線照射装置の構成を示す図である。図1の荷電粒子線照射装置ではスキャニング場とし

13

て電磁石等により磁場を発生していたが、この実施の形態の荷電粒子線照射装置20では、間にギャップを設けて向き合われた2枚の電極の間にスキャニング場としてスキャニング電場を発生させる。

【0046】図11において、93a、93b、95aおよび95bは電極、97は上記電極を支持する絶縁体、102は上記各電極および絶縁体等を支持するステンレス等から作られた箱、99a、99bは電源、103は上記各電極93a、93b、95aおよび95bに電圧を供給するためのケーブル、105はケーブルコネクタ、49は箱102をこれを搭載した回転駆動用歯車53を介して回転させるためのモータである。

【0047】電極93a、93b、95aおよび95bは方向が互いに逆向きの電場を発生させ、入射された荷電粒子線ビーム31をそれぞれ逆の方向に同じ角度だけ曲げることによって、常に入射方向と平行なビームをスキャニングする。また、箱102全体を回転させることにより、照射領域に於いて2次元平行ビームスキャニングを実現できる。

【0048】また、この実施の形態による荷電粒子線照射装置を実施の形態2の荷電粒子線回転照射装置101における荷電粒子線照射装置20として用いることもできる。

【0049】実施の形態4、図12はこの発明による荷電粒子線回転照射装置の制御部分の構成を示す図である。この制御部分は、例えば図9に示された荷電粒子線回転照射装置の制御を行うもので、特にビームのスキャニング制御に関する部分を抽出して示した。

【0050】図12において、200は例えばパーソナルコンピュータ等からなる制御装置で、201は入出力制御部(以下I/O)、202は一時記憶部であるRAM、203はビーム照射の設定条件等の各種情報を格納したデータベース、204は処理部であるCPU、205は制御のためのプログラム等が格納するROM、206は他の装置との間のインターフェース(以下I/F)、207はこれらを相互に接続するバスである。そしてこの制御装置200には、ビームストップ9、エネルギーディグレーダ21、線量・位置モニタ23、照射ベッド27、および照射装置20のモータ49、49a、49b、並びに電磁石33、35、電極93a、93b、95a、95bに相当するスキャニング場発生部が接続されている。

【0051】また、図13にはこの制御装置200で行われる制御のフローチャート図を示す。この制御装置200は、例えばこれのROM205に格納されたプログラムPに従って動作する。

【0052】以下、図9、12、13に従って制御動作について説明する。まず、患者25に於ける照射領域の3次元位置座標群[P<sub>i</sub>: i=1, 2, ..., n]、例えば円柱座標系では[(θ<sub>i</sub>, r<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>), i=1, 2, ..., n](θは角度方

14

向、rは径方向、Zは深さ方向)が予め作成して置いた設定テーブルから照射系を制御している制御装置200にI/F206を介してロードされる(ステップS1)。

【0053】次に、患者25を照射ベッド27に載せ、患者25の固定と位置合わせを行う(ステップS2)。このステップS2は可動の照射ベッド27の位置決めで行える場合もあるが、人手が必要になる場合もある。次に、照射位置座標Z<sub>i</sub>(初期値i=1)に合わせて、エネルギーディグレーダ21の厚さを設定する。そして照射位置座標(θ<sub>i</sub>, r<sub>i</sub>)に合わせて、スキャニング電磁石33、35の回転角度および磁場強度を設定する(ステップS3)。

10

【0054】次に、荷電粒子線ビーム31を照射し(ステップS4)、荷電粒子線31の入射粒子数および位置を線量・位置モニタ23で測定する(ステップS5)。次に、ステップS5で測定した位置座標とステップS3で設定した位置座標を比較し(ステップS6)、一致しない場合は、後記のビーム31を停止するステップS8に移る。ステップ6の比較結果で測定と設定の位置座標が一致した場合、ステップS5で測定した粒子数の積算値が照射を開始する前に決めておいた所定位置での設定粒子数以上か否かを判定する(ステップS7)。越えていない場合はステップS5に戻り、越えている場合は、荷電粒子線ビーム31をビームストップ9を用いて停止させる(ステップS8)。

20

【0055】次に、照射を終了するかどうかを判断し(ステップS9)、続ける場合はiを1つ増加させて、ステップS3に戻り、照射を終了させる場合にはステップS10で終了させる。

30

【0056】上記の方法で、i=1からi=nまで、ステップS3からステップS9までを繰り返して実行し、位置座標群[(θ<sub>i</sub>, r<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>), i=1, 2, ..., n]で記述される3次元照射領域のすべてのスポットに所定粒子数[N<sub>i</sub>, i=1, 2, ..., n]を照射する。

【0057】ここで、ステップS1とステップS2の実施順番を入れ替えたとしても効果が同じである。また、上記の方法において、スキャニング電磁石33、35の回転速度が磁場強度によるスキャニング速度およびエネルギーディグレーダ21によるスキャニング速度よりも遅いので、回転角度θ<sub>i</sub>を一定に保って、他の2方向によるスキャニングを先に行った方が照射に係る全体の時間を短縮できる。

40

【0058】なお、上記説明ではエネルギーの変化手段として、上記エネルギーディグレーダ21の厚さを変化させることにしていたが、他のエネルギーの変化手段、例えばシンクロトロン粒子加速器などを用いてもよい。また、上記荷電粒子線ビームの停止手段として、ビームストップ9を例に用いて説明したが、他のビーム停止手段(例えば、粒子加速器などを止める)でもよい。

50

【0059】さらに、照射領域を記述する3次元位置座

15

標群 [ $P_i : i=1, 2, \dots, n$ ] として円柱系座標を例に用いたが、円柱系座標を変形させた他の座標系でも適用可能である。また上記説明では、荷電粒子線のスキャニング手段としてスキャニング電磁石 33、35 を備えた照射装置 20 を用いたが、これに限るものではなく、他の荷電粒子線のスキャニング手段、例えば、実施の形態 3 のスキャニング電極を備えた照射装置 20 等を用いてもよい。

【0060】実施の形態 5. 図 14 は図 12 の制御装置 200 で行われる別のある方法の制御のフローチャート図を示す。実施の形態 4 と同様に、荷電粒子線ビーム 31 の初期エネルギーは既にエネルギーディグレーダ 5 の設定で一定であるとする。

【0061】以下、図 9、12、14 に従って制御動作について説明する。まず、患者 25 に於ける照射領域の位置座標群  $[(Z_i, \theta_{ij}), i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n]$  およびスキャニングパターンの時間特性  $[l_{ij}(t), j=1, 2, \dots, n]$  が予め作成して置いた設定テーブルから照射系を制御している制御装置 200 に I/F 206 を介してロードされる(ステップ S1)。これらの位置座標は、深さを記述する位置座標  $Z_i$ 、その深さにおける回転角度  $\theta_{ij}$ 、およびその角度における直径または半径方向のスキャニングパターンの時間特性  $l_{ij}(t)$  を用いて、3 次元照射領域を表している。

【0062】次に、患者 25 を照射ベッド 27 に載せ、患者 25 の固定と位置合わせを行う。このステップ S2 は可動の照射ベッド 27 の位置決めで行える場合もあるが、人手が必要になる場合もある。次に、照射位置座標  $Z_i$ (初期値  $i=1$ )に合わせて、エネルギーディグレーダ 21 の厚さを設定する(ステップ S3)。次に、スキャニング電磁石 33、35 の回転角度を  $\theta_{ij}$ (初期値  $j=1$ )に、電磁石に流す電流のスキャニングパターンを  $l_{ij}(t)$  に設定する。

【0063】次に、荷電粒子線ビーム 31 を照射し(ステップ S5)し、ステップ S4 で設定したスキャニング電磁石 33、35 の電流スキャニングパターンに従って、所定回数だけ電流をスキャニングさせる。すなわち、例えば円柱座標系の半径あるいは直径の間ににおいて、予め設定された電流スキャニングパターンを示す  $l_{ij}(t)$  に従ってスキャニング電磁石 33、35 に電流を供給する(ステップ S6)。また入射する荷電粒子線ビームの強度が時間と共に変動する場合は、電流スキャニングのパターンを後述するステップ S10 の中で線量・位置モニタ 23 によって実時間で測定する荷電粒子数の時間増加率に基づいて制御し、所望の照射粒子数分布を形成する。

【0064】そして所定回数のスキャニングが完了すると、ビーム 31 をビームストップ 9 を用いて停止させる(ステップ S7)。次に、照射を終了するかどうかを判断し(ステップ S8)、終了する場合は後述するステップ S

16

12 に飛ぶ。ステップ S8 の判断で照射を継続する場合は、次の深さに対応する位置座標  $Z_i$  に移るかどうかを判断し(ステップ S9)、次の位置座標  $Z_i$  に移る場合は  $i$  を 1 つ増加させ、 $j$  を初期値の 1 にしてステップ S3 に戻る。次の位置座標  $Z_i$  に移らない場合は  $j$  を 1 つ増加させて、ステップ S4 に戻る。

【0065】このようにして、 $i=1$  から  $i=m$  まで、 $j=1$  から  $j=n$  まで上記ステップ S3 からステップ S9 までおよびステップ S3 からステップ S8 までを繰り返してを実行し、所定の照射領域を照射する。

【0066】また、照射中に、照射した荷電粒子数および位置を線量・位置モニタ 23 で常に測定し(ステップ S10)、ステップ S10 で測定した位置座標とステップ S4 で設定した位置座標  $\theta_{ij}$  を比較し、両者が一致する場合はステップ S10 に戻り、不一致の場合には荷電粒子線ビーム 31 をビームストップ 9 を用いて停止させる(ステップ S8)。

【0067】ここでスキャニングパターン  $l_{ij}(t)$  について説明する。図 15 はこの実施の形態の荷電粒子線照射方法に於ける荷電粒子線 31 のスキャニングの軌跡の例を示している。38 はスキャニングされた荷電粒子線ビーム 31 の断面を示したものである。図 15 では半径の区間のみスキャニングを示しているが、直径の区間に渡ってスキャニングを行うこともできる。

【0068】また、この実施の形態に記載された荷電粒子線照射方法において、入射する荷電粒子線ビーム 31 の単位時間当たりの粒子数およびビーム形状が一定である場合は、スキャニングパターン  $l_{ij}(t)$  を図 6(半径)または図 7(直径)のようにすれば、図 15 で示したように照射領域をスキャニングした時に、図 4 で示しているような平坦な粒子数密度分布を実現できる。

【0069】図 6 および図 7 のようにスキャニングパターン  $l_{ij}(t)$  を基本的に時間変数  $t$  の平方根に比例するようによることによって、図 15 で示しているスキャニングにおいて掃引速度を回転中心軸からの距離に反比例するように制御できる。それは図 5 で示したように電磁石 33、35 に流す電流とスキャニング距離とは比例関係にあるためである。また、掃引速度と回転中心軸からの距離の反比例関係は図 4 の平坦な粒子数密度分布を実現できる。

【0070】さらに、図 15 で示した入射軸 30 を中心に回転角度ごとに、半径のみに渡ってスキャニングする方が、直径に渡ってスキャニングするのに比べて図 1 で示したスキャニング電磁石 33、35 の磁極幅 41、ビームの方向に沿った長さをそれぞれ短くでき、照射装置の小型軽量化が図れる。

【0071】また上記説明では、荷電粒子線のスキャニング手段としてスキャニング電磁石 33、35 を備えた照射装置 20 を用いたが、これに限るものではなく、他の荷電粒子線のスキャニング手段、例えば、実施の形態

17

3のスキャニング電極を備えた照射装置20等を用いてもよい。この場合、スキャニングパターン $|ij(t)$ に従つて照射装置20へ供給する電圧を変えることになる。すなわち電圧スキャニングパターン $|ij(t)$ となる。

【0072】また、上記各実施の形態の装置および方法は荷電粒子線治療の装置に限るものではなく、半導体分野や材料分野等の荷電粒子線の照射または注入を必要とする分野にも広く応用できる。

【0073】

【発明の効果】以上のようにこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段と、上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生手段を回転させる回転手段と、で荷電粒子線照射装置を構成したので、2軸方向平行ビームスキャニングが行える小型の荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0074】また、上記スキャニング場発生手段を磁場を発生するものとしたので、スキャニング磁場を発生する小型の荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0075】また、上記スキャニング場発生手段を電場を発生するものとしたので、スキャニング電場を発生する小型の荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0076】またこの発明では、上記荷電粒子線を照射面に垂直になるように偏向する荷電粒子線の偏向手段と、この偏向手段の下流側に設置され、上記荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記偏向手段からの荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線エネルギー調整手段と、少なくとも上記偏向手段および荷電粒子線照射装置を一体化して回転させる回転移動手段と、で荷電粒子線回転照射装置を構成したので、2軸方向平行ビームスキャニングが行える小型の荷電粒子線照射装置を設けたので被照射体を移動させる必要がなく、かつこの荷電粒子線照射装置を偏向手段の下流側に設けたので偏向手段を小形化できるため、小形の荷電粒子線回転照射装置を提供できる。

【0077】またこの発明では上記荷電粒子線回転照射装置において、上記荷電粒子線が上記回転移動手段の回転軸方向から上記偏向手段に入射され、上記偏向手段は、照射面に平行な方向から入射された荷電粒子線を3回の90度の偏向により照射面に垂直になるように偏向する3つの偏向電磁石を含み、上記被照射体が上記回転移動手段の回転軸上に配置されるようにしたので、上記回転移動手段の制御が容易な荷電粒子線回転照射装置を提供できる。

【0078】またこの発明では上記荷電粒子線回転照射装置において、上記偏向手段の各偏向電磁石を超電導電

18

磁石で構成したのでさらに小形の荷電粒子線回転照射装置を提供できる。

【0079】またこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられ照射された荷電粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、上記荷電粒子線を停止させる手段と、上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、を備え、上記制御手段が、照射領域の座標群[P<sub>i</sub>: i=1, 2, ..., n] (初期値としてi=1)に合わせて上記スキャニング場発生部の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1の手段と、上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2の手段と、上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3の手段と、上記荷電粒子線が停止された時に、全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していないければ、iを1つ増加させて上記スキャニング場発生部の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1の手段から第3の手段を繰り返し起動させ、完了していれば照射を終了する第

30 4の手段と、を備えた荷電粒子線照射装置を構成したので、被照射体を移動されることなく正確な位置に正確な線量の照射を行える荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0080】またこの発明では上記荷電粒子線照射装置において、上記第4の手段において、上記スキャニング場発生部の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生部の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1の手段から第3の手段を繰り返して起動させるようにしたので、変化速度の遅い回転角度の調整回数を減らすことにより、照射に係る

40 全体の時間を短縮した荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0081】またこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生部、および上記荷電粒子線の入射軸を中心に上記スキャニング場発生部を回転させる回転部を含み、上記荷電粒子線をスキャニングさせる荷電粒子線照射装置と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられた荷電粒子線のエネルギーを調整する荷電粒子線エネルギー調整手段と、上記荷電粒子線照射装置と被照射体の間に設けられ照射された荷電

50

19

粒子線の線量および位置をモニタする線量・位置測定手段と、上記荷電粒子線を停止させる手段と、上記各手段に接続されてスキャニング制御を行う制御手段と、を備え、上記制御手段が、照射領域の座標群[( $Z_i, \theta_{ij}$ ),  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ]のうちの照射深度の位置座標 $Z_i$ (初期値として $i=1$ )に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1の手段と、上記スキャニング場発生部の回転角度を $\theta_{ij}$ (初期値として $j=1$ )に、スキャニングパターンの時間特性を $|ij(t)$ に設定する第2の手段と、上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性 $|ij(t)$ により上記スキャニング場発生部を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3の手段と、この第3の手段のスキャニングと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4の手段と、上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5の手段と、上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していない時は照射深度の位置座標 $Z_i$ を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合は $j$ を1つを増加させて、上記第2の手段から第5の手段を繰り返して起動させ、変更する場合は $i$ を1つを増加させ、 $j$ を初期値の1にして、上記第1の手段から第5の手段を繰り返して起動させる第6の手段と、を備えた荷電粒子線照射装置としたので、被照射体を移動させることなく正確な位置に正確な線量の照射を行える荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0082】またこの発明では上記荷電粒子線照射装置において、上記スキャニング場発生部が上記スキャニングパターンの時間特性 $|ij(t)$ を $|ij(t) \propto \sqrt{t}$ としたので、より均一な照射が可能な荷電粒子線照射装置を提供できる。

【0083】またこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心に回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、照射領域の座標群[P $i$ :  $i=1, 2, \dots, n$ ] (初期値として $i=1$ )に合わせて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2のステップと、上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3のステップと、上記荷電粒子線が停止された時に、

10

全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していない場合は上記第1のステップに戻り、 $i$ を1つ増加させて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返し、完了していれば照射を終了する第4のステップと、を備えた荷電粒子線照射方法としたので、被照射体を移動させることなく正確な位置に正確な線量の照射を行える荷電粒子線照射方法を提供できる。

10

【0084】またこの発明では荷電粒子線照射方法において、上記上記第4のステップで、上記スキャニング場発生手段の回転角度を一定に保持し、上記スキャニング場発生手段の場の強度および荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返すようにしたので、変化速度の遅い回転角度の調整回数を減らすことにより、照射に係る全体の時間を短縮した荷電粒子線照射方法を提供できる。

10

【0085】またこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心に回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、照射領域の座標群[( $Z_i, \theta_{ij}$ ),  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ ]のうちの照射深度の位置座標 $Z_i$ (初期値として $i=1$ )に合わせて照射する荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、上記スキャニング場発生手段の回転角度を $\theta_{ij}$ (初期値として $j=1$ )に、スキャニングパターンの時間特性を $|ij(t)$ に設定

30

する第2のステップと、上記設定に従って荷電粒子線を照射させ、上記スキャニングパターンの時間特性 $|ij(t)$ により上記スキャニング場発生手段を駆動し荷電粒子線を所定回数スキャニングする第3のステップと、この第3のステップと並行して、上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致するか否かを判定する第4のステップと、上記スキャニングが所定回数行われた時および上記荷電粒子線の照射位置座標が設定位置座標と一致しない時に上記荷電粒子線を停止させる第5のステップと、上記荷電粒子線が停止された時に全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していれば照射を終了し、完了していない時は照射深度の位置座標 $Z_i$ を次の値に変更するか否かを判断し、変更しない場合は $j$ を1つを増加させて、上記第2のステップに戻り第2のステップから第5のステップを繰り返し、変更する場合は $i$ を1つを増加させ、 $j$ を初期値の1にして、上記第1のステップに戻り第1のステップから第5のステップを繰り返す第6のステップと、を備えた荷電粒子線照射方法としたので、被照射体を移動させることなく正確な位置に正確な線量の照射を行える荷電粒子線照射方法を提供できる。

40

【0086】またこの発明では、荷電粒子線を互いに逆方向に同じ角度だけ曲げる1組の場からなるスキャニング場を発生するスキャニング場発生手段で上記荷電粒子線をこれの入射軸に垂直な面上の一直線上をスキャンさせると共に上記スキャニング場発生手段を上記入射軸を中心に回転させて照射領域に荷電粒子線を照射する荷電粒子線の照射方法であって、照射領域の座標群[P $i$ :  $i=1, 2, \dots, n$ ] (初期値として $i=1$ )に合わせて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを設定する第1のステップと、上記設定に従って荷電粒子線を照射させる第2のステップと、上記荷電粒子線の照射された粒子数が予め設定された設定粒子数以上になった場合および上記荷電粒子線の照射位置座標が予め設定された設定位置座標と一致しない場合のいずれかの場合に上記荷電粒子線を停止させる第3のステップと、上記荷電粒子線が停止された時に、

50

全ての照射領域への照射が完了したか否かを判断し、完了していない場合は上記第1のステップに戻り、 $i$ を1つ増加させて上記スキャニング場発生手段の回転角度、場の強度、および上記荷電粒子線のエネルギーを所定の順序で変更しながら上記第1のステップから第3のステップを繰り返し、完了していれば照射を終了する第4のステップと、を備えた荷電粒子線照射方法としたので、被照射体を移動させることなく正確な位置に正確な線量の照射を行える荷電粒子線照射方法を提供できる。

【0086】またこの発明では上記荷電粒子線照射方法において、上記スキャニング場発生手段が1回に照射領域の半径のみに渡ってスキャニングを行い、上記スキャニングパターンの時間特性  $|ij(t)| \propto \sqrt{t}$  としたので、より均一な照射が可能な荷電粒子線照射方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の一実施の形態による荷電粒子線照射装置の構成を示す図である。

【図2】 図1のスキャニング電磁石の断面図である。

【図3】 図1のスキャニング電磁石の透視側面図である。

【図4】 この発明による荷電粒子線照射装置により荷電粒子線を均一に照射した場合の粒子数密度分布を示す図である。

【図5】 この発明における入射荷電粒子線ビームのスキャニング距離と電磁石の電流の関係を示す図である。

【図6】 この発明における荷電粒子線を均一に照射するためのスキャニングパターンの時間特性を示す図である。

【図7】 この発明における荷電粒子線を均一に照射するためのスキャニングパターンの時間特性を示す図である。

【図8】 この発明による荷電粒子線照射装置のスキャニング電磁石の他の構成例を示す図である。

【図9】 この発明の一実施の形態による荷電粒子線回転照射装置の構成を示す図である。

【図10】 図9の荷電粒子線回転照射装置の偏向電磁

石の構造を示す図である。

【図11】 この発明の別の実施の形態による荷電粒子線照射装置の構成を示す図である。

【図12】 この発明の別の実施の形態による荷電粒子線回転照射装置の特に制御系の構成を示す図である。

【図13】 この発明の荷電粒子線回転照射装置の制御系の動作の一例を示すフローチャート図である。

【図14】 この発明の荷電粒子線回転照射装置の制御系の動作の別の例を示すフローチャート図である。

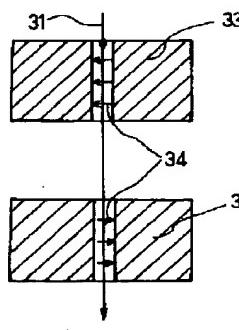
【図15】 この発明による荷電粒子線ビームを径方向に渡ってスキャニングする様子を示す図である。

【図16】 従来の荷電粒子線回転照射装置の構成を示す図である。

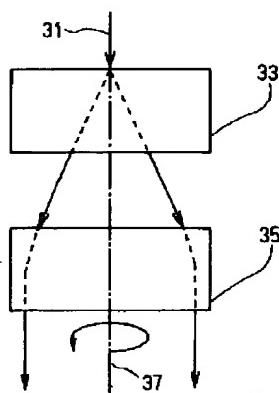
【符号の説明】

1 粒子加速器、3 輸送系電磁石、5, 21 エネルギーディグレーダ、9 ビームストップ、10 回転ガントリー、11, 13, 19 偏向電磁石、15 集束電磁石、20 荷電粒子線照射装置、23 線量・位置モニタ、25 患者、27 照射ベッド、29 ガントリー回転軸、30 入射軸、31 荷電粒子線ビーム、33, 35 スキャニング電磁石、37 回転軸、45, 47 連結フレーム、49, 49a, 49b モータ、53 回転駆動用歯車、55 掃引軌跡、56 照射領域、57 被照射体、93a, 93b, 95a, 95b 電極、97 絶縁体、99a, 99b 電源、100 荷電粒子線回転照射装置、102 箱、103 ケーブル、105 ケーブルコネクタ、200 制御装置。

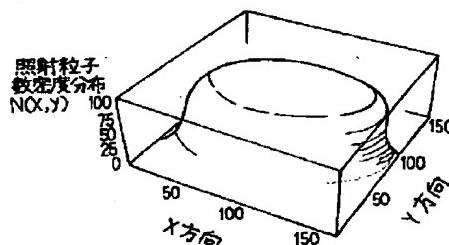
【図2】



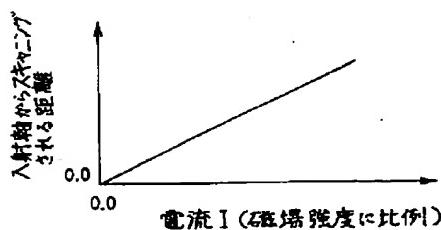
【図3】



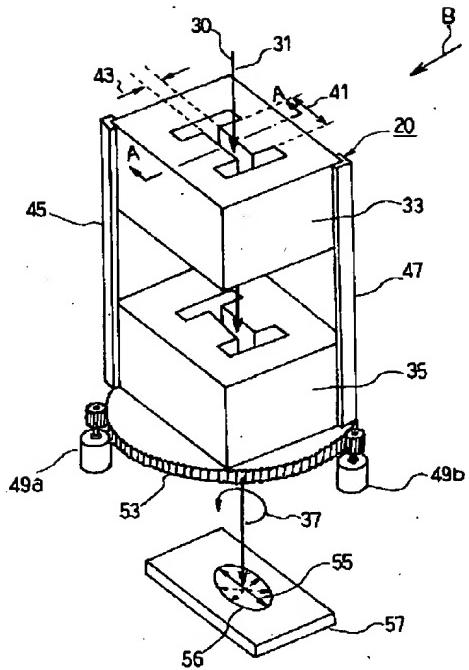
【図4】



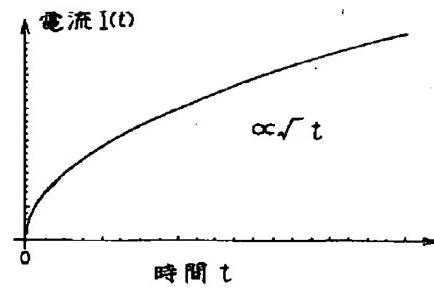
【図5】



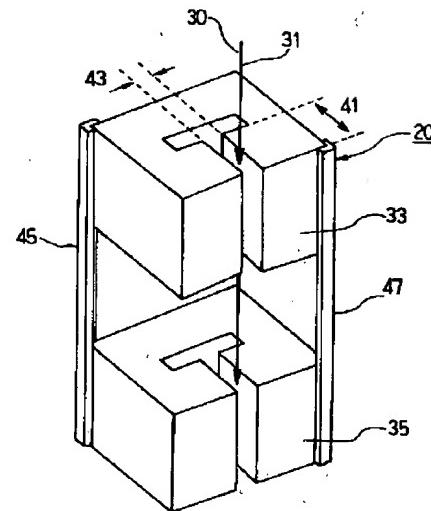
【図1】



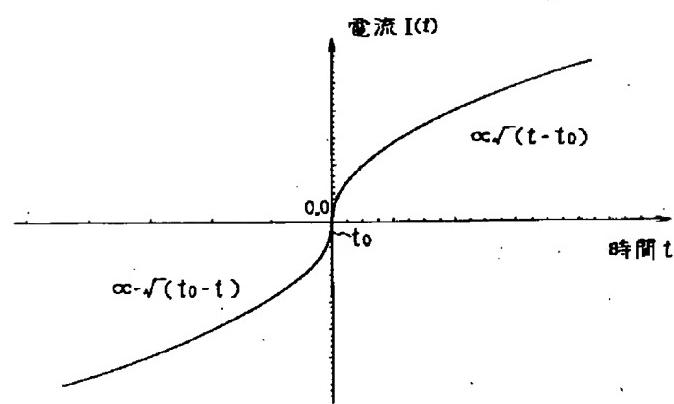
【図6】



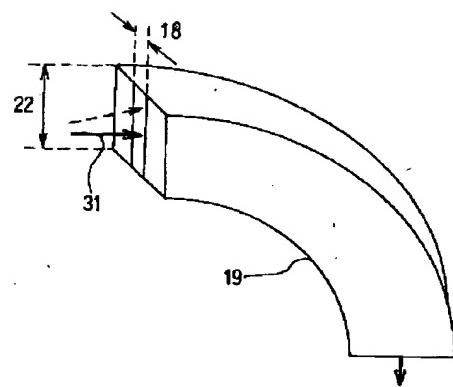
【図8】



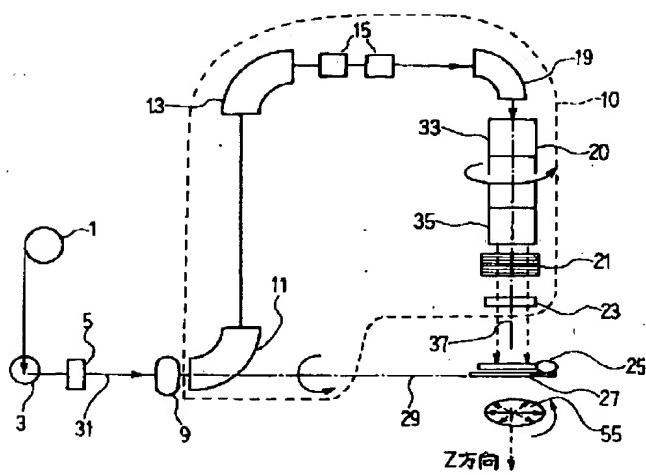
【図7】



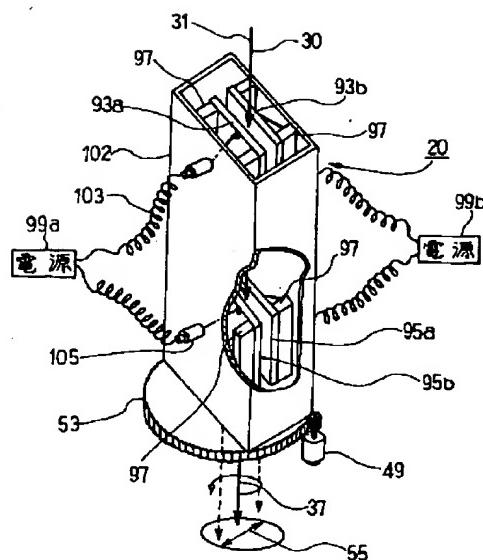
【図10】



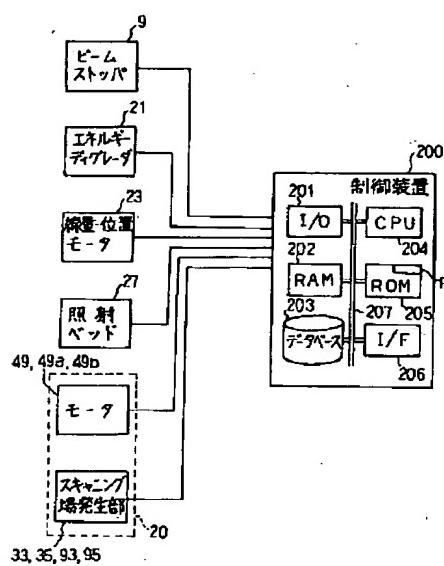
【図9】



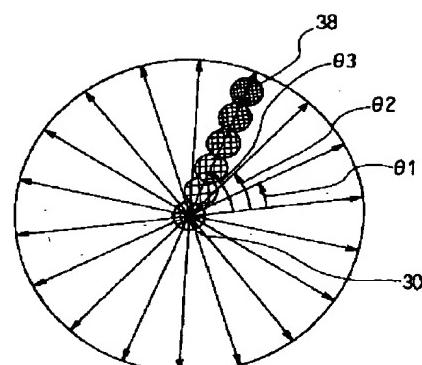
【図11】



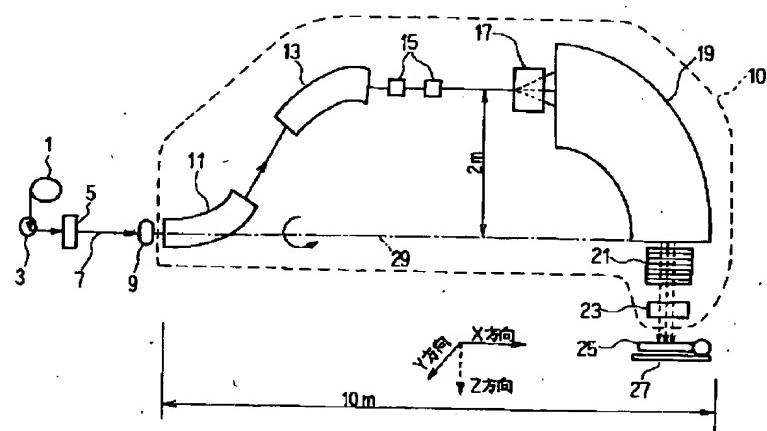
【図12】



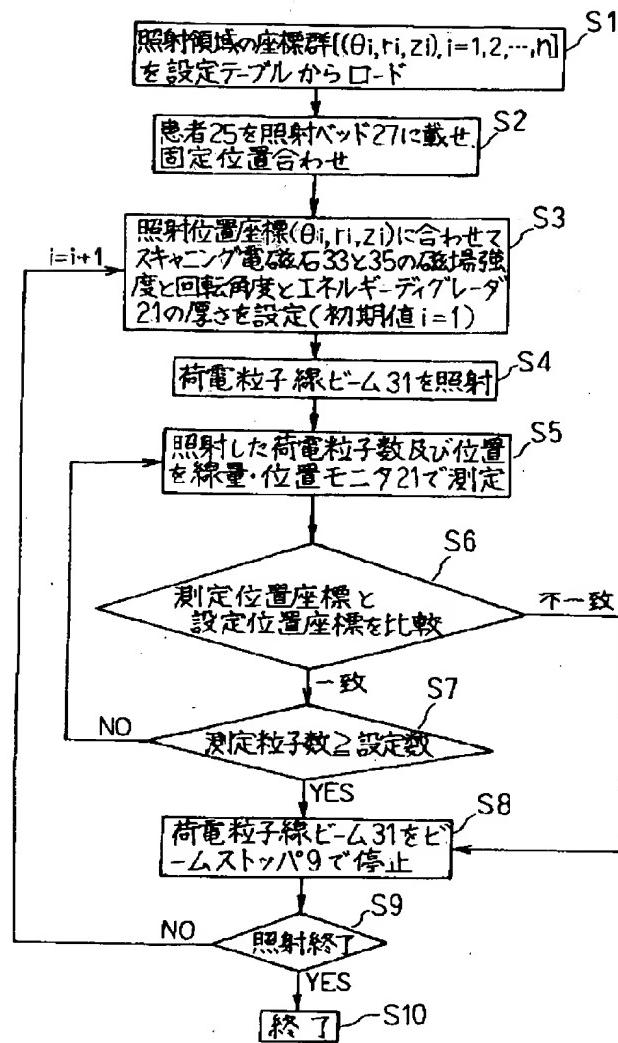
【図15】



【図16】



【図13】



【図14】

